

# Prevenición, seguimiento y evaluación de la descontaminación de percloroetileno en suelo y aguas subterráneas en un terreno industrial

## Tutores:

### Autor

**Felipe Caballero Biosca**

Llicenciatura de Ciències Ambientals  
Universitat Autònoma de Barcelona

**Albert Folch i Sancho**

Unitat de Geodinàmica externa i hidrogeologia  
Departament de Geologia  
Universitat Autònoma de Barcelona

**Paula F. Rodríguez i Escales**

Unitat de Geodinàmica externa i hidrogeologia  
Departament de Geologia  
Universitat Autònoma de Barcelona

## Resumen

La contaminación de suelos y aguas subterráneas es uno de los problemas ambientales más extendidos en gran parte de los terrenos industriales de Cataluña. En este proyecto se ha analizado el proceso de gestión de la contaminación: caracterización, remediación y seguimiento de la descontaminación en suelos y aguas subterráneas por un caso de afección por organoclorados (percloroetileno) y otros contaminantes (hidrocarburos, selenio y cromo) en un emplazamiento industrial situado en una zona agroforestal (superficie de 81.462 m<sup>2</sup>). A partir de la implantación en la empresa del sistema de gestión ISO 14.001 en 1.996, se abrieron diferentes proyectos de gestión para los posibles contaminantes. Por las mismas fechas, también se detectó una afección por selenio en aguas subterráneas, ajena a la empresa de estudio.

Por el momento, el único contaminante que ha requerido de un proceso de descontaminación ha sido el percloroetileno. En suelos se emplea el método “*soil vapor extraction*” y en aguas subterráneas el método “*air-stripping*”.

Finalmente, se ha llevado a cabo una comparación de los costes reales derivados del proceso de descontaminación del percloroetileno en contra de los costes que se hubiesen derivado la implantación de medidas de prevención de la contaminación. El resultado de la valoración indica que la descontaminación de éste compuesto requiere de una inversión económica importante, unas 10 veces más elevada que los costes derivados de las medidas de prevención.

**Palabras clave:** suelos contaminados, percloroetileno, hidrocarburos halogenados volátiles, prevención de la contaminación, costes de descontaminación.

## Resum

La contaminació de sòls i aigües subterrànies és un dels problemes ambientals més extesos a gran part dels terrenys industrials de Catalunya. En aquest projecte s'ha analitzat el procés de gestió de la contaminació: caracterització, remediació i seguiment de la descontaminació de sòls i aigües subterrànies per un cas d'afecció per organoclorats (Percloroetilè) i altres contaminants (hidrocarburs, seleni i crom) en un emplaçament industrial situat a una zona agroforestal (superfície de 81.462 m<sup>2</sup>). A partir de la implantació a la empresa del sistema de gestió ISO 14.001 al 1.996, es van obrir diferents projectes de gestió per als possibles contaminants. Per les mateixes dates, també es va detectar una afecció per seleni a les aigües subterrànies, aliena a l'empresa d'estudi. Pel moment, l'únic contaminant que ha calgut d'un procés de descontaminació ha estat el percloroetilè. En sòls es va emprà el mètode “*soil vapor extraction*” i a les aigües subterrànies el mètode “*air-stripping*”.

Finalment, s'ha portat a terme una comparació dels costos reals derivats del procés de gestió de la contaminació per percloroetilè en contra dels costos que s'haguessin gastat en la implantació de mesures de prevenció de la contaminació. El resultat de la valoració indica que la descontaminació d'aquest compost, requereix d'una inversió econòmica important, unes 10 vegades més elevada que els costos de les mesures de prevenció.

**Paraules clau:** sòls contaminats, percloroetilè, hidrocarburs halogenats volàtils, prevenció de la contaminació, costos de descontaminació

## Abstract

Soil and groundwater pollution is one of the main environmental issues in a important proportion of the industrial areas of Catalonia. In this project we have analysed the contamination management process: characterization, remediation and monitoring for a case of affection for organochloride (perchloroethylene) and another contaminants (mineral oils, selenium and chromium) in an industrial site located in an agroforestry zone (surface of 81,462 m<sup>2</sup>). Since the company implementations of norm ISO 14,001 in 1996, different management projects for potential contaminants have been opened. At the same time a selenium affection in groundwater outside the research company was detected.

At the moment, the only contaminant that has required a decontamination process has been perchloroethylene. In soils, the *Soil Vapor Extraction* method was used, and the *Air-Stripping* method was used for groundwater.

Finally, a comparison between real costs of the management process of perchloroethylene pollution and potential costs for the implementation of measures to prevent pollution, was made. The outcome of this comparison indicates that the remediation of this compound requires a major investment, about 10 times higher than the costs of preventive measures.

**Keywords:** soil pollution, perchloroethylene, volatile halogenated hydrocarbons, pollution prevention, remediation costs

## 1. Introducción y objetivos

Desde el siglo XX hasta la actualidad, Cataluña ha sido testigo de un intenso crecimiento económico provocado principalmente por el desarrollo de la industria y el sector servicios. Debido a la ignorancia, a la falta de normativas o a la priorización del crecimiento económico, fue frecuente el vertido/deposición de aguas residuales/residuos sin un control como el actual. Esta situación ocasionó una disminución de la calidad y la cantidad de suelos y masas de agua aptos para mantener dichas actividades.

Ante esta situación, la administración ha sido el principal actor a la hora de desarrollar las bases legales para la corrección de los errores del pasado y para administrar la correcta gestión actual. La Ley 10/1.998, de Residuos fue la primera normativa española que hace mención a la contaminación de suelos. El desarrollo de la Ley 10/1.998, se llevó a cabo a partir de la publicación del Real Decreto 9/2.005 (RD 9/2.005, de ahora en adelante). Este reglamento establece los criterios para declarar un suelo como contaminado y las obligaciones derivadas de ello. Las aportaciones más importantes de esta norma son los Niveles Genéricos de Referencia (NGR, de ahora en adelante) y la lista de actividades potencialmente contaminantes del suelo (APS, de ahora en adelante). Los NGR indican la concentración de contaminantes a partir de la cual un suelo debe de ser evaluado si está contaminado o no. Las APS son una serie de actividades que según su código CNAE (*Clasificación Nacional Actividades Económicas*), deben de realizar un Informe Preliminar de Situación (IPS, de ahora en adelante) obligatoriamente. El IPS se trata de un informe en el cual se resumen todos los aspectos que podrían haber influido en la calidad del suelo históricamente. La Agència de Residus de Catalunya (ARC, de ahora en adelante), a partir de la valoración de los IPS, puede solicitar información/estudios adicionales sobre la posible contaminación del suelo y en caso necesario, la toma de acciones para la disminución de riesgos a las personas o a los ecosistemas.

En relación a la contaminación de las aguas subterráneas, las bases legales de su gestión, vienen dadas a nivel comunitario por la Directiva Marco del Agua (Directiva 2.000/60/CE). En el caso de España y Cataluña, pese a no haber una reglamentación homologa al RD 9/2.005 de suelos, para el desarrollo de la Directiva, la Agència Catalana de l'Aigua (ACA de ahora en adelante) ha publicado diferentes guías o documentos que marcan los criterios para definir un acuífero como contaminado y los protocolos de actuación (ACA, 2009a y b).

El PCE es un organoclorado muy usado en el pasado para la limpieza en seco de ropa o bien para el desengrase de metales. Los organoclorados protagonizan el 8% de todos los casos de contaminación de suelos (ARC, 2.010)

y el 25% de las afecciones a aguas subterráneas (ACA 2.008). La naturaleza nociva de algunos organoclorados ha sido reconocida durante más de 30 años (Pozas, 2.009). Muchos organoclorados como el PCE, los PCBs o el DDT son compuestos cancerígenos o posiblemente cancerígenos (IARC, 2.011). Según un estudio realizado por el Institut Català d'Oncologia, se ha demostrado que de 956 personas incluidas en el estudio, prácticamente el 100% de las personas tienen concentraciones séricas de organoclorados (Agudo, 2.011). Así, los organoclorados son compuestos peligrosos y con una amplia presencia en la sociedad, lo cual implica un riesgo claro para la salud de las personas y el medio ambiente.

Los procesos de descontaminación de suelos y aguas subterráneas se caracterizan por ser trabajos muy costosos en los cuales pueden ser necesarios muchos años de tratamiento para su total saneamiento. Para las actividades que ya tienen el suelo o las aguas contaminadas, no les queda otra opción que la remediación. Sin embargo, en los terrenos que aún no lo están, pero que debido a las primeras materias utilizadas existe riesgo de contaminación, una opción, normalmente muy rentable es la prevención de la contaminación.

En este contexto, el objetivo principal de este proyecto es el análisis de la gestión de la descontaminación (caracterización, descontaminación y control) de organoclorados (PCE) en el suelo y las aguas subterráneas de un emplazamiento industrial para posteriormente llevar a cabo una comparación entre los costes reales de descontaminación y los costes que habrían supuesto las medidas de prevención a la contaminación.

Por temas de confidencialidad, durante el proyecto se ha intentado que en ningún apartado aparezcan datos que permitan identificar y/o ubicar la zona de estudio. A su vez, el nombre de la empresa gestora de la mayoría de suelos, Letka, también es ficticio, debido a que con los datos de esta empresa, se podría llegar a conocer la situación y nombre de la empresa de estudio.

## **2. Marco teórico**

El PCE es una sustancia manufacturada no inflamable a temperatura ambiente que se evapora con facilidad (Presión de vapor a 20 °C: 1,9 kPa). Una vez el compuesto se ha derramado en el suelo, si la cantidad derramada es pequeña es probable que se volatilice. Si el vertido es de mayor magnitud, el contaminante migrará verticalmente por los poros del suelo, quedando una parte absorbida en el suelo y otra parte, en forma gaseosa ocupando los pequeños espacios presentes entre las partículas del suelo (Grathwohl, 1.993). Según Letka, empresa experta en procesos de descontaminación de suelos, el hormigón es permeable al PCE, lo que puede provocar fugas no esperadas a través de este material (afirmación no contrastada a partir de otra bibliografía). Si la fuga es muy grande, es posible que el PCE siga migrando verticalmente hasta llegar a la zona saturada. Cuando la concentración de PCE en agua es superior a la solubilidad (150 ppm), se crea la fase libre, en este caso más densa que el agua (DNAPL). Los compuestos DNAPL, al ser más densos que el agua, tienen una migración esencialmente vertical hasta que el contaminante llega a la base de la zona saturada en la cual, comienzan a movilizarse horizontalmente. Por tanto, la parte soluble del contaminante se moverá condicionada por el flujo del agua subterránea mientras que la fase libre en la base del nivel acuífero se moverá por la fuerza de la gravedad.

El PCE es una sustancia catalogada como probable cancerígena (IARC, 2A), la exposición a altos niveles de PCE puede producir mareo, dolores de cabeza, somnolencia, confusión, náuseas o incluso la muerte (ATSDR). Por esto, la administración ha incluido a este compuesto en las listas de productos de riesgo para los humanos o los ecosistemas.

El PCE pertenece a una serie de compuestos denominados hidrocarburos halogenados volátiles. Además del PCE, dentro de estos compuestos se encuentran productos como el diclorometano, el cloruro de vinilo, el tricloroetileno (TCE, de ahora en adelante), el 1,2-Dicloroetileno, cis/tran (1,2-DCE,cis/trans), etc. Muchos de estos compuestos se generan a partir de diferentes procesos de degradación del propio PCE (como son el TCE, el 1,2-DCE,cis/trans o el cloruro de vinilo).

Como se ha comentado en la introducción, en la empresa de estudio, además del uso de PCE también se utilizaban otras primeras materias como el ácido crómico o los aceites minerales. Estos productos, pese a no ser el objeto de estudio, debido a su peligrosidad para las personas o el medio ambiente también están regulados y por tanto, también ha requerido de una gestión en el suelo y las aguas subterráneas.

El selenio, al igual que el cromo o los aceites minerales también es un compuesto peligroso en altas concentraciones. Este compuesto se detectó en las aguas subterráneas del emplazamiento por una contaminación

ajena a las actividades de la empresa. De la gestión que se ha llevado de este compuesto, no se tiene demasiada información debido a que la empresa de estudio solo ha tenido acceso a la sentencia judicial derivada de dicha contaminación y a las analíticas realizadas en los pozos propios de la empresa de estudio.

### **3. Descripción de la zona de estudio**

La empresa de la zona de estudio, lleva en activo desde el año 1.987. El recinto de la planta tiene una superficie de 81.462 m<sup>2</sup> y está situado en un entorno agroforestal con viviendas e industrias aisladas. Esta empresa en sus inicios preparaba piezas metálicas directas de fundición para su posterior montaje. Primeramente, se sometía a las piezas a un proceso de anodizado de la capa superficial con ácido crómico. Posteriormente la pieza se mecanizaba utilizando aceites emulsionables en agua como agente lubricante y finalmente se eliminaban los restos de aceites y grasas con un proceso de lavado con PCE.

Durante todos estos años de trabajo, debido principalmente a la ignorancia de los peligros derivados del trabajo con cromo, aceites y PCE, no se controló lo suficiente el buen estado de la maquinaria. El mantenimiento deficiente produjo pequeñas fugas o goteos que fueron produciendo continuas filtraciones en el suelo. No es hasta la realización de los trámites necesarios para la inclusión en la certificación ISO 14.001 y la consecuente realización de una auditoría ambiental (1.996), cuando se toma conciencia de los errores en la gestión de suelos realizada en el pasado y los costes que ellos conllevarán en el futuro. Una de las repercusiones de la auditoría, fue la presentación de un plano de la planta con las zonas potencialmente contaminadas por las primeras materias utilizadas de carácter peligroso (PCE, aceites minerales y ácido crómico). Durante la década siguiente, se llevaron a cabo diferentes proyectos encaminados a determinar el estado del subsuelo y si fuese necesario, como en el caso del PCE, a aplicar medidas de descontaminación.

Las instalaciones se encuentran situadas sobre una zona agrícola de relieves alomados a unos 200 m sobre el nivel del mar. A escasos metros del borde de la propiedad está la Riera Verde que desemboca en el Río Rojo, situado a 1 km de distancia al oeste. La litología predominante de la zona corresponde a materiales de relleno de la Depresión Prelitoral compuestos por materiales aluviales neógenos del Mioceno Medio, formado por arcosas cálcicas y lutitas. Los tramos cercanos a los cauces fluviales se encuentran cubiertos por sedimentos del Cuaternario, correspondientes a arenas, gravas y arcillas. Las instalaciones se emplazan sobre unos 40-60 cm de relleno antrópico compuesto por gravas, arcillas, escombros, etc. que descansan sobre los materiales neógenos del Mioceno Medio. En la zona de estudio, el acuífero superficial está formado por el nivel de arcosas y lutitas miocénicas (ECA, 1999). El freático se encuentra a una profundidad de 10-11 m y a partir de distintas campañas de nivelación (Letka, 2.003a y b) pudo conocerse que el sentido de flujo del agua subterránea es de componente suroeste (gradiente hidráulico 2,5%).

El hecho de que el proceso de gestión de suelos y aguas subterráneas se haya llevado a cabo desde 1.996 hasta la actualidad ha permitido que en este proyecto se muestren los cambios legales que ha habido durante todo este periodo de tiempo. Por esta razón, durante el proyecto se podrán observar diferentes niveles de referencia o normativas de aplicación según si existía o no una normativa estatal en ese momento.

### **4. Trabajos realizados para la caracterización, implantación del método de descontaminación y evolución del emplazamiento**

#### **- Gestión de la contaminación por PCE en la zona no saturada**

Como se ha comentado con anterioridad, a partir de la implementación de la norma ISO 14.001 y sus requerimientos, se llevó a cabo una auditoría ambiental que hiciera un resumen de los riesgos más destacados originados por la gestión ambiental llevada hasta la fecha. En este documento se publicó un mapa en el cual se señalaban una serie de áreas con posible afección, del suelo y las aguas subterráneas, por PCE (Letka, 1.996). Ver figura 1.

Siguiendo con las recomendaciones de la auditoría ambiental, en 1.999, se llevaron a cabo 6 sondeos en las zonas de producción con mayor posibilidad de contaminación (Figura 1). A partir de los muestreos realizados en cada uno de los sondeos, se detectaron concentraciones de PCE superiores a los valores de intervención de las Listas Holandesas (4 mg/Kg suelo) en 5 de los 6 sondeos. La concentración máxima fue detectada en la zona de desengrase con una concentración de PCE en suelo de 715 mg/Kg (ECA, 1.999).

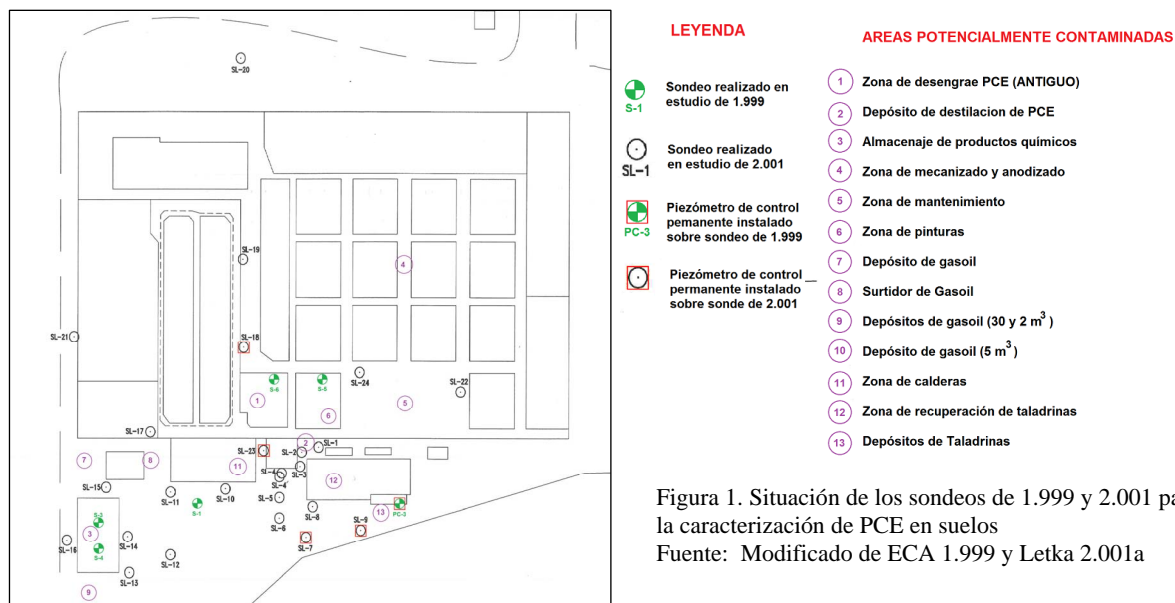


Figura 1. Situación de los sondeos de 1.999 y 2.001 para la caracterización de PCE en suelos  
Fuente: Modificado de ECA 1.999 y Letka 2.001a

Tras informar a la ARC de la contaminación detectada, en 2.001, Letka empresa experta en procesos de caracterización y descontaminación de suelos, realizó 24 sondeos más, para caracterizar por completo del alcance de la contaminación por PCE (Figura 1). En este estudio, el muestreo se realizó a partir de la extracción del aire intersticial del suelo ya que el PCE, al ser un componente volátil, en las muestras directas de suelo se escapa parte del contaminante. Como ni en el RD 9/2.005, ni en las Listas Holandesas existen valores de referencia en muestras de gas del suelo, se utilizó el criterio técnicamente aceptado que considera que concentraciones superiores a 50 mg/m<sup>3</sup>, frecuentemente, causan afección no aceptable en aguas subterráneas (LAWA, Sociedad Federal de Aguas de Alemania). Aprovechando 4 de los sondeos realizados, se instalaron 4 piezómetros de control permanente (PVMP). Estos PVMP, se efectuaron con el fin de facilitar la monitorización y toma de muestras de la zona no saturada en un futuro (Letka, 2.001a).

Los resultados de los 24 sondeos, dieron a conocer tres posibles focos de contaminación (Figura 2):

- Zona de desengrase de piezas metálicas: concentraciones superiores a 10.000 mg/m<sup>3</sup> de aire.
- Almacén de productos químicos: concentraciones del orden de 2.800 mg/m<sup>3</sup> de aire.
- Exteriores frente a central de taladrinas: concentraciones del orden de 9.000 mg/m<sup>3</sup> de aire.

Tras los resultados observados, el suelo se declaró claramente contaminado por PCE. Esto supuso la adopción de medidas correctivas. El tratamiento de descontaminación de la zona no saturada propuesto fue el método denominado *Soil Vapor Extraction*. Este método consiste en el bombeo de aire del suelo a partir de pozos de extracción (VEW) y hacerlos pasar por filtros de carbón activo. Para estos terrenos, hicieron falta 4 pozos de extracción en total: tres pozos (VEW-1, VEW-2 y VEW-4) funcionan a partir de una bomba y un sistema de filtraje (VES-1) y el pozo restante (VEW-3) funciona con otro sistema de bomba y filtraje (VES-2) (ver situación en figura 4). El VES-1, se encarga de la descontaminación de la zona de desengrase y exteriores y el VES-2 del almacén de productos químicos (Letka, 2.001b).

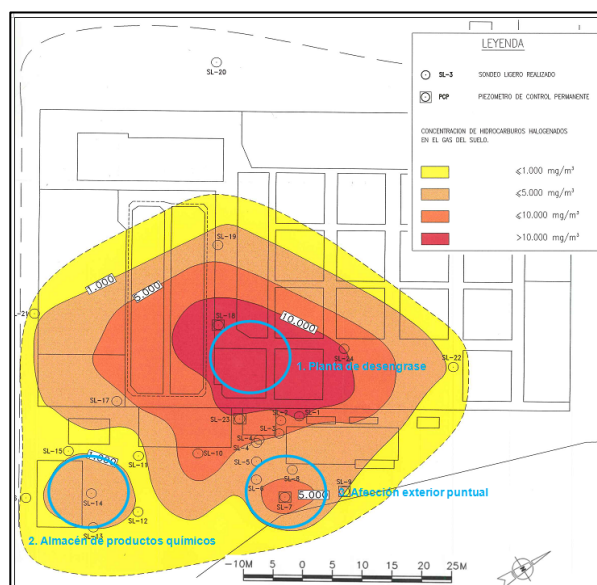


Figura 2. Plano de isolíneas de la contaminación por PCE en 2.001 y situación de los puntos principales de contaminación.  
Fuente: Modificado de Letka 2.001a



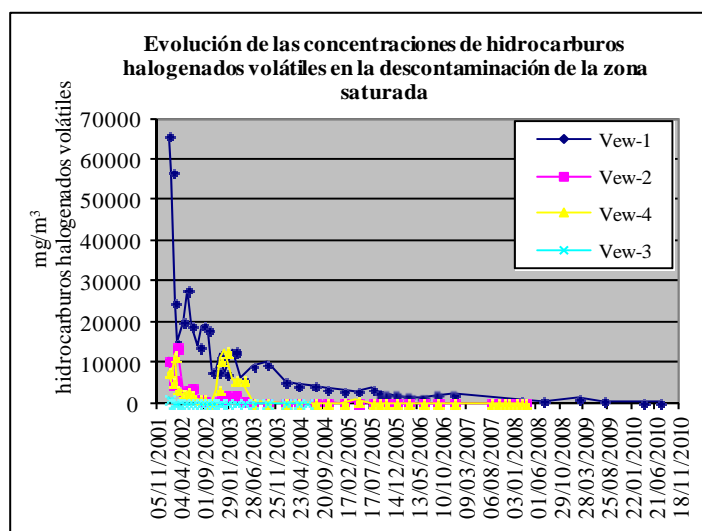


Figura 3. Evolución de las concentraciones de hidrocarburos halogenados volátiles en el aire del suelo desde 2.001 a 2.010  
Fuente: Elaboración propia, Letka 2.010

vez, ver cuál será la carga residual que quedará en el suelo una vez pare la extracción de aire por completo. Tras la puesta en marcha de esta fase, el pozo VEW-3, se pudo dar por saneado en junio de 2.004 y los pozos VEW-2 y VEW-4 en marzo de 2.008, lo que dejó únicamente en funcionamiento al pozo VEW-1. En este pozo, la evolución también ha sido muy positiva ya que se han pasado de concentraciones iniciales de 67.832 mg/m<sup>3</sup> de hidrocarburos halogenados volátiles a concentraciones en junio de 2.010 de 150 mg/m<sup>3</sup> (Letka 2.010). Con estos resultados se espera que en pocos meses, al igual que en el resto de pozos, también se pueda comenzar con la fase final del saneamiento. El cierre final puede encontrarse en unos pocos meses o bien en unos años, todo dependerá de si la evolución sigue a la baja o por lo contrario, si se mantiene por encima de los 50 mg/m<sup>3</sup> durante más tiempo.

#### - Gestión de la contaminación por PCE en la zona saturada

En 1.999, tras la detección de PCE en suelos, la empresa de estudio solicitó incluir el análisis de hidrocarburos halogenados volátiles en las muestras periódicas de agua del pozo N° 4 (Figura 4) para ver si la afección detectada en suelos había migrado a la zona saturada. En la primera analítica (18/07/1.999) se detectó una concentración total de hidrocarburos halogenados volátiles de 1.802 µg/L de los cuales 1.145 pertenecían a PCE (Dr. Oliver Rodès, 1.999). En aquel momento, como valor de referencia se utilizó la concentración de 10 µg/L de la suma de PCE y TCE. A finales de 2.001, tras seguir con resultados positivos en aguas del pozo N° 4, se acordó con las administraciones competentes (ACA y ARC) realizar un seguimiento de la contaminación en el pozo N° 4 y en el pozo de la finca colindante situada aguas abajo (Pozo N° 5). No se decidió comenzar con un proceso de descontaminación del acuífero debido a que en ese momento, ya estaba prevista la descontaminación de la zona no saturada y la extracción de agua solo podía facilitar la migración suelo-agua. Así pues se decidió, esperar a que las concentraciones de PCE en suelo disminuyeran para comenzar con la descontaminación de la zona saturada.

Con las primeras analíticas de los pozos situados en la finca colindante, se detectaron concentraciones positivas en el pozo 5 (304 µg/L) y en la Mina 1 (17 µg/L). Tras estos resultados, se solicitó a Letka un método que permitiera a la masía poder utilizar el agua del pozo 5 como agua sanitaria. Se propuso la instalación de filtros de carbón activo los cuales, tras demostrar su eficacia, se realizaron las obras pertinentes. El sistema, hasta el momento, ha funcionado correctamente proporcionando agua con niveles inferiores al valor de intervención de las Listas Holandesas (40 µg/L).

En 2.003, tras haberse observado una disminución considerable de las concentraciones de hidrocarburos volátiles en los pozos de extracción de aire, se comenzaron las labores para la implantación de un sistema de tratamiento y contención en las aguas subterráneas. Los objetivos fijados para el sistema de tratamiento de aguas fueron que, además de la descontaminación del agua subterránea, contuviera en la medida de lo posible la afección a las aguas de las fincas colindantes. Para conseguir este fin, Letka realizó un estudio de las características físicas e hidrogeológicas del pozo N° 4 para valorar la opción de utilizarlo como barrera de contención (Letka, 2.003c). A

El sistema de descontaminación se puso en marcha el día 17/01/2.002 y actualmente se encuentra en una fase muy avanzada de la descontaminación. Durante la extracción de contaminante, todos los pozos VEW tuvieron un comportamiento similar. En los primeros meses de tratamiento, las concentraciones disminuyeron de forma exponencial hasta unas concentraciones muy inferiores a las detectadas inicialmente. A partir de ese momento (1-2 años desde el inicio del tratamiento) la evolución fue más lenta. En los pozos VEW-2, VEW-3 y VEW-4, una vez detectados los primeros resultados inferiores a 50 mg/m<sup>3</sup> (VEW-4 en 2.002 y VEW-2 y VEW-3 en 2.008 y 2.005 respectivamente) iniciaron la fase final del saneamiento. Esta fase consiste en alternar periodos de parada y funcionamiento (de 2 semanas a un mes) con el objetivo de concentrar la cantidad de contaminante y a su

partir de los trabajos, se observó que el pozo tenía 3 galerías a 12 m de profundidad y de al menos 10 metros de largo. Dos de esas galerías se situaban prácticamente de forma perpendicular al flujo de agua, lo cual junto a las concentraciones de PCE (2.113 µg/L) y a los aportes de agua posibles (2,7 L/s) se consideró al pozo N° 4 apto para su utilización como barrera de contención de la contaminación por hidrocarburos halogenados volátiles. De todos modos, se aconsejó la realización de como mínimo, un pozo paralelo al pozo N° 4 pero situado más al norte que ampliara la barrera de contención en caso de ser necesario.

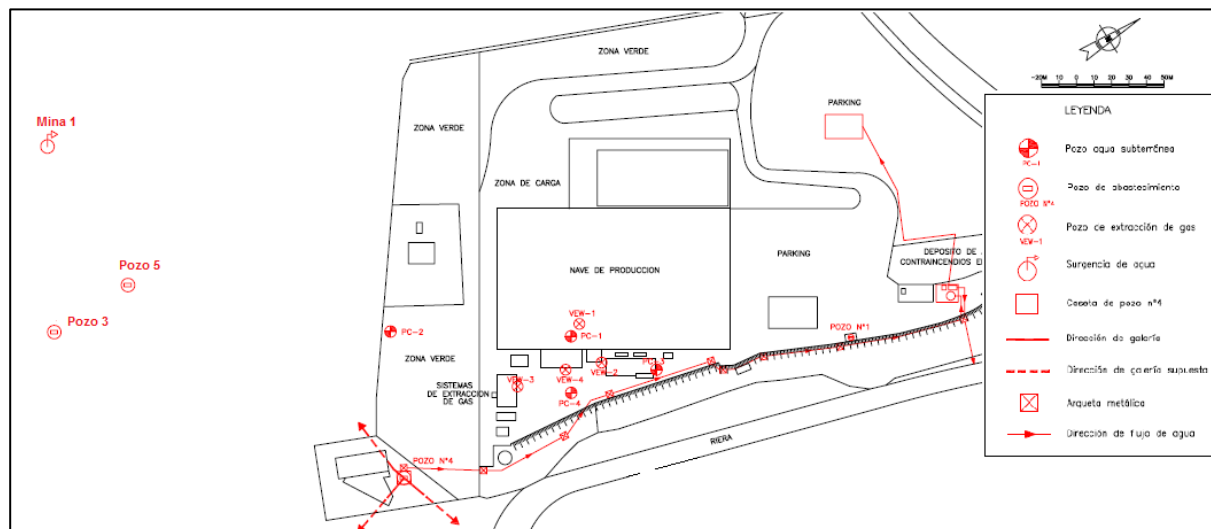


Figura 4. Situación de los pozos y minas del entorno de la zona de estudio del Percloroetileno  
Fuente: Modificado Letka 1:2.000

Entre agosto y septiembre de 2.003, siguiendo las recomendaciones de los trabajos de estudio de las características del pozo N° 4, se llevó a cabo la construcción de dos nuevos pozos de extracción. Uno de ellos se realizó tal y como se había recomendado, paralelo al pozo N° 4 (PC-2) y otro en el foco de contaminación (PC-1), junto al pozo VEW-1. Tras realizarse los trabajos para evaluar la transmisividad (0,053 m<sup>2</sup>/día; muy baja transmisividad), la permeabilidad del acuífero (0,004 m/día; muy baja permeabilidad) y las concentraciones de PCE (<10 µg/L) en cada uno de los pozos, se observó que ninguno de los dos cumplía con los requisitos para permitir un tratamiento eficaz de la zona saturada.

Finalmente y tras la aceptación del ACA y del ARC, se planeó un sistema que únicamente utilizara el pozo N° 4 como barrera de contención para PCE. Esto se conseguiría creando un cono de depresión realizando un bombeo en continuo que disminuyera la profundidad del nivel freáticos desde su situación cota natural (de -7,5 a -8,5 m, según la estación) a una cota máxima de -11m respecto a la superficie del terreno. La profundidad máxima se fijó a 11m para evitar desperfectos en las paredes de las galerías del pozo N° 4. El método de tratamiento propuesto se denomina *stripping* y al igual que el tratamiento de suelos, también se basa en la alta volatilidad de los hidrocarburos halogenados a tratar. Este tratamiento utiliza una columna con diferentes bandejas agujereadas donde se hace pasar agua contaminada por la parte superior, mientras que por la parte inferior se inyecta aire, creando un burbujeo en el cual se transmite el contaminante del agua, al aire. El agua una vez tratada tiene dos posibles vías de desguace, un depósito de agua sanitaria para la planta o retorno a la riera, aguas arriba al foco de contaminación. Tras la realización de los trabajos y las pruebas de funcionamiento necesarios, el 15/06/2.004 dio comienzo el bombeo en continuo del pozo N° 4 para la contención y el tratamiento de PCE de la zona saturada (Letka 2.004a).

La evolución de la descontaminación de la zona saturada, ha sido mucho más lenta que en la zona no saturada (Ver figura 5). En las aguas subterráneas se observa como las concentraciones de hidrocarburos halogenados

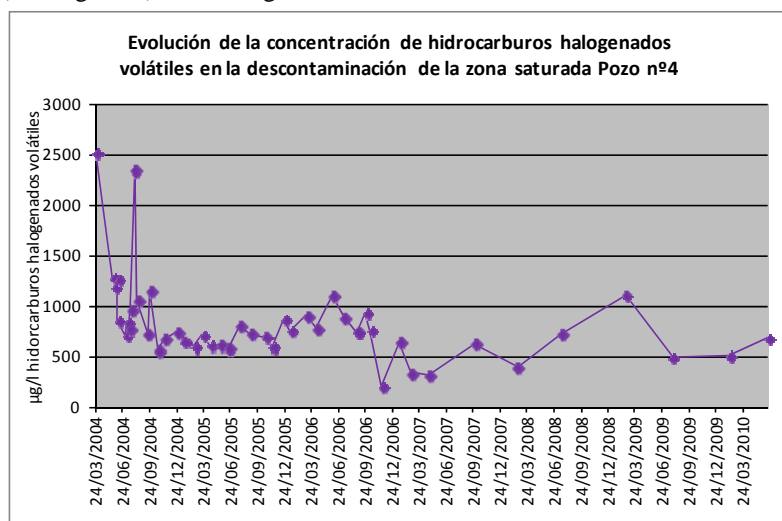


Figura 5. Evolución de las concentraciones de hidrocarburos halogenados volátiles en las aguas del pozo N° 4 desde 2.004 a 2.010.

Fuente: Letka 2.010

volátiles podrían verse influenciadas por las épocas lluviosas y secas. Otro factor a tener en cuenta en las variaciones de concentración es el hecho de que el PCE, al ser más denso que el agua, hace que se movilece, además de con el flujo de agua subterráneo, también por la acción de la gravedad. En el último análisis (15/06/2.010) se detectaron concentraciones de hidrocarburos halogenados de 682,9 µg/L (Letka, 2.010). Durante la evolución de la remediación de la zona saturada, también se está observando un progresivo aumento de los compuestos de degradación anaeróbica del PCE (PCE a TCE, TCE a 1,2, DCE, cis/trans). El siguiente compuesto de la cadena de degradación anaeróbica tras el 1,2,

DCE, cis es el cloruro de vinilo. Este compuesto pese a ser conocida su peligrosidad (cancerígeno tipo 1, IARC, 2011) no se está analizando. En un futuro se podría incluir dentro de las analíticas para tener mayor conocimiento del comportamiento del PCE en el medio y como medida de seguridad según el uso que se esté dando al agua subterránea en las instalaciones (agua sanitaria).

Actualmente, a diferencia del caso de la zona no saturada, en la evolución de la descontaminación de acuíferos no se puede prever una fecha de fin de tratamiento debido principalmente, a las variaciones a los que este medio está sometido. Esto podría significar que la descontaminación de este medio se encuentre todavía en una fase muy poco madura y que necesite más años de tratamiento.

#### - Gestión de la contaminación por otros contaminantes

##### ▪ Selenio.

Es muy común que en emplazamientos industriales se detecten contaminaciones de base, ajenas a la actividad industrial propiamente dicha. En este caso en particular, a partir de 1.997, se comenzaron a detectar concentraciones de selenio superiores al límite en aguas potables (10 µg/L, según RD 140/2.003 de criterios de sanitarios de la calidad de aguas de consumos) en el pozo N° 1 (Dr. Oliver Rodès, 1997). Tras presentar denuncia ante la Junta de Sanejament, en junio de 2.006, se condenó a la empresa situada aguas arriba por un delito contra el medio ambiente y a la indemnización a la empresa de estudio por los daños producidos (Sentencia judicial, 2.006). Actualmente la contaminación por selenio en las aguas subterráneas ya se detecta en el pozo en pozo N° 4 también (concentraciones <500 µg/L), y las concentraciones en el pozo N° 1 son del orden de 2.000-1.500 µg/L. Actualmente aun se resta a la espera de implementar un método efectivo que pueda solucionar la contaminación producida.

##### ▪ Cromo III y cromo VI

En la auditoría ambiental de 1.996, además de los PCE, también se marcó el cromo como un posible contaminante debido al uso en las instalaciones de ácido crómico. Entre 2.003 y 2.005 se llevaron a cabo un total de 14 sondeos en las zonas de trabajo con ácido crómico para la caracterización de este, en el suelo. A partir de los resultados se observó una afección superior a los criterios de calidad del suelo (ARC) por cromo VI (0,1 mg/Kg) en algunas zonas de la capa superficial del suelo (20-60 cm), bajo la solera de hormigón. Pese a la detección, se concluyó que la exposición personal se podía considerar mínima ya que entre el medio y los trabajadores existía una losa de hormigón y el cromo no es un componente volátil. A su vez, al no detectarse concentraciones de cromo en profundidad se pudo afirmar que el riesgo de migración a las aguas también era muy bajo. Con estas dos afirmaciones se pudo concluir que la afección por cromo no es demasiado grave,



aconsejando en caso de obras, el análisis de los suelos para su correcta gestión (Letka, 2.003d, e, f, 2.004b - 2.005a).

- Aceites minerales

Otro de los posibles contaminantes del suelo, marcado en la auditoría ambiental de 1.996 fueron los hidrocarburos totales del petróleo (TPH o aceites minerales). En un estudio realizado en 1.999 para la investigación de la contaminación por PCE y aceites, se detectaron concentraciones muy altas (13.133 mg/Kg) de TPHs en la zona de la central de taladrinas. Aunque estas concentraciones superaran ampliamente los NGR (50 mg/Kg), la afección por aceites, se dejó pospuesta hasta la presentación del Informe Preliminar de Situación (Letka, 2.005b). Tras la presentación del IPS, la ARC, solicitó ampliar la caracterización y valorar el estado de esta contaminación. Tras la perforación de 11 sondeos más, en la zona de trabajo y almacenaje de aceites minerales, se observó una afección superficial y en profundidad en la base de la central de taladrinas (volumen total del orden de 74.100 m<sup>3</sup> y concentraciones superiores a 12.500 mg/Kg de TPHs). También se detectó afección en las aguas subterráneas cercanas a la central de taladrinas por TPHs de baja movilidad (Letka, 2.006). Tras la realización de un análisis de riesgos se valoró que ninguna de las zonas tenía un riesgo inaceptable debido principalmente al aislamiento de la contaminación con la base de hormigón y a la poca movilidad de los contaminantes. Actualmente únicamente se continúa con la monitorización de las aguas subterráneas para asegurar que la migración de TPHs está siendo muy baja.

## **5. Medidas de prevención de la contaminación y comparación económica entre los costes de dichas medidas y los costes de la descontaminación.**

Tras la valoración de las zonas de trabajo o almacenaje con PCE se observan tres puntos en los cuales se utilizaba este producto:

- Zona de desengrase: tres máquinas situadas sobre hormigón y con capacidad para 1 m<sup>3</sup> de PCE
- Destilador de PCE: un destilador y un depósito con capacidad para 1,6 m<sup>3</sup>
- Almacén de productos químicos: edificación aislada con cubetas de retención de 1 m<sup>3</sup> y con contenedores con un volumen máximo de 216,5 L por contenedor

Tras realizar una valoración de las posibles vías de entrada de contaminante al suelo, se optó por distintas medidas de prevención:

- Cubetas de retención metálicas bajo todas las máquinas de desengrase y destilador: un total de 4 bandejas de retención con capacidad superior a la cantidad almacenada en cada una de las máquinas. Las bandejas además de prevenir posibles fugas de los equipos también previenen de fugas o goteos durante los trabajos y fugas de los contenedores.
- Recubrimiento de los alrededores de las zonas de uso y almacenamiento de PCE con resina Epoxi. Esta resina, según su ficha técnica, no es válida como barrera total al paso de PCE pero sí es efectiva a contactos esporádicos como salpicaduras o accidentes puntuales. En total se tuvo en cuenta un recubrimiento de 379 m<sup>2</sup>, que es la superficie de suelo de las zonas de trabajo o almacenamiento más habituales de trabajo con PCE.
- Inclusión en las formaciones periódicas de los trabajadores de un apartado sobre buenas prácticas de manipulación del PCE: Esta formación va encaminada a trabajadores y carretilleros que pudiesen trabajar con PCE. La formación entre los trabajadores complementa las bandejas y el Epoxi, además de concienciar de los peligros de este compuesto.

- Costes derivados de las medidas de implantación de las medidas preventivas propuestas:

Tabla 1. Balance de costes totales derivados de los trabajos de implantación de las medidas de prevención propuestas.  
Fuente: Elaboración propia.

Medio de contención	Precio global	IVA 18%	Precio Neto
Bandejas de retención <sup>1</sup>	28.688,43 €	762,30 €	29.448,73 €
Recubrimiento resina Epoxi <sup>2</sup>	8.546,23 €	1.538,32 €	10.084,55 €
Inclusión en la formación periódica a operarios de un apartado específico de buenas prácticas en trabajos con PCE <sup>3</sup>	240 €	---	240 €
<b>Costes totales de implantación de los medios de prevención propuestos</b>	<b>37.474,66 €</b>	<b>2.300,62 €</b>	<b>39.775,28 €</b>

1 Oferta de precios realizada por la empresa Rebel, S.A. Ingeniería Galvánica y Aguas. Personal de mantenimiento sin IVA.

2 Oferta de precios realizada por Espacios Diáfanos, S.L.

3 Precio de 16 horas técnico ambiental (15 €/hora).

Los costes derivados de la compra e implantación de los equipos (tabla 1), también tienen en cuenta trabajos de mantenimiento durante 10 años (aproximadamente el mismo periodo de tiempo que el evaluado por la gestión de la contaminación por PCE, 2.001-2.010) para asegurar el buen estado de los equipos de prevención. No se ha realizado ningún tipo de depreciación de la moneda a costes de 2.001. Los precios son reales para Junio de 2.011.

- Costes derivados de la descontaminación llevada a cabo desde los inicios de la descontaminación hasta la actualidad:

Tabla 2. Balance de costes totales derivados de los trabajos de caracterización, tratamiento y contención de la contaminación por PCE desde inicio de la gestión (2.001) hasta la actualidad (2.010).

Fuente: Elaboración propia. Datos: Letka 2.001 – 2.010 .

Etapas de gestión	Trabajos incluidos	Coste sin IVA	16 % IVA	Total
<b>Zona no saturada</b>				
Caracterización (2.001-2.002)	Estudios de caracterización de la zona no saturada y perforación de pozos	30.123,1 €	4.819,7 €	34.942,9 €
Equipo y puesta en marcha (2.002)	Compra de los sistemas VES-1 y VES-2, instalación y puesta en marcha	49.140,0 €	7.862,4 €	57.002,4 €
Seguimiento (2.002-2.010)	Informes de seguimiento y mantenimientos varios (se adjunta la mitad del precio de los estudios conjuntos de la zona saturada y no saturada)	166.226,50 €	26.596,2 €	192.822,7 €
<b>Subtotal de la zona no saturada</b>		<b>245.489,7 €</b>	<b>39.278,4 €</b>	<b>284.768,0 €</b>
<b>Zona saturada</b>				
Caracterización (2.003-2.004)	Estudios de caracterización de la zona saturada y perforación de pozos	27.443,5 €	4.391,0 €	31.834,5 €
Equipo y puesta en marcha (2.004)	Compra del equipo de “Stripping”, instalación, ajustes iniciales y puesta en marcha	66.246,4 €	10.599,4 €	76.845,8 €
Seguimiento (2.004-2.010)	Informes de seguimiento y mantenimientos varios (se adjunta la mitad del precio de los estudios conjuntos de la zona saturada y no saturada)	82.706,3 €	13.233,0 €	95.939,3 €
<b>Subtotal de la zona saturada</b>		<b>176.359,7 €</b>	<b>28.217,5 €</b>	<b>204.577,2 €</b>
<b>Costes Totales del proceso de descontaminación de PCE en los terrenos industriales</b>		<b>421.849,4 €</b>	<b>67.495,8 €</b>	<b>489.345,2 €</b>

Los costes mostrados en la tabla 2, son los gastos derivados de todo el proceso de gestión de suelos y aguas subterráneas desde 2.001 a 2.010. Los datos se encuentran desglosados por zona saturada y zona no saturada y por la etapa de gestión a la que pertenecen (caracterización, puesta en marcha o seguimiento).

## 6. Discusión y conclusiones

- La caracterización de un emplazamiento contaminado requiere del estudio de diversos vectores ambientales como suelo, agua i aire siendo necesario múltiples métodos de muestreo (sondeos ligeros, extracción de gases, etc.).
- La caracterización del subsuelo es una tarea compleja y que a menudo no responde a un esquema sencillo El pozo de extracción de agua (PC-1) pese a estar sobre el foco de contaminación, tiene concentraciones de contaminante bajos.
- Los contaminantes se comportan diferente dependiendo del medio en el que se encuentran. En suelos, la descontaminación es más estática, mientras que en la zona saturada puede ser movilizada más fácilmente por el movimiento del agua y/o por la acción de la gravedad (en el caso del PCE).
- Normativas incompletas o inexistentes. Se ha podido observar la gran variedad de criterios utilizados en la gestión de suelos y pese a la publicación del RD 9/2005, tener que utilizar un criterios extranjeros para tener un nivel de referencia de la contaminación en el aire del suelo. En aguas se ha podido ver que pese a la publicación de documentos oficiales, aun no existe una normativa propiamente dicha que legisle los niveles de referencia y los pasos a seguir en casos de contaminación de aguas subterráneas. Por lo que, aunque ya se están estableciendo las bases de gestión de la contaminación, aun falta experiencia en todos los agentes encargados de su gestión: responsable, administración y consultor.
- Se recomienda, ampliar en el muestreo las analíticas de cloruro de vinilo debido a su peligrosidad y disminuir la periodicidad de los compuestos no detectados (diclorometano, triclorometano...).
- Se ha constatado que los costes de descontaminación son mucho más elevados que los costes de la implantación de medidas preventivas. Las medidas correctivas, han supuesto un gasto 10 veces superior a lo que hubiese costado la instalación de las medidas de prevención propuestas. La valoración sigue estando a favor de la prevención incluso sin haberse dado por finalizado el proceso de descontaminación y no haberse devaluado los precios de la prevención a niveles del 2.001.

## 7. Bibliografía.

- ACA (Agència Catalana de l'Aigua). 2.008. Restauració d'aqüífers contaminats per fonts d'origen puntual.
- ACA (Agència Catalana de l'Aigua). 2.009a. Criteris d'aplicació dels valors genèrics per a la restauració d'aigües subterrànies en emplaçaments contaminants per fonts d'origen puntual.
- ACA (Agència Catalana de l'Aigua). 2.009 b. Protocol d'actuació en episodis de contaminació d'aigües subterrànies per fonts d'origen puntual.
- Agudo, Antonio. 2.011. Exposición a organoclorados en estudio EPIC-España.; ICO (Institut Català d'Oncologia).
- ARC (Agència de Residus de Catalunya) 2.010. Estat actual de la gestió de sòls i aqüífers contaminats a Catalunya. Doménech i Paituví.
- CE (Comisión Europea. European), Union Risk Assessment Report. PCE. 2.005. S.J. Munn, R. Allanou, K. Aschberger, F. Berthault, O. Cosgrove, M. Luotamo, S. O'Connor, S. Pakalin, A. Paya-Pérez, G. Pellegrini, S. Scheer, B. Schwarz-Schulz, S. Vegro
- Directiva 2.000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2.000, por el que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Dr. Oliver Rodès. 1.999-2.010. Analíticas de aguas pozos.
- ECA. 1.999. Estudio de caracterización de la potencial contaminación en el subsuelo de las instalaciones.

- Grathwohl, P; Reinhard. 1.993. Desorption of trichloroethylene in aquifer material: rate limitation at the grain scale. M. Environ. Sci. Technol, 27.
- IARC (International Research Cancer). 2.011. Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1-102.
- Junta de Residuos. Criterios provisionales de calidad del suelo de Cataluña Cromo III y VI
- Ley 10/1.998, de 21 de abril, de Residuos.
- Letka.1.996. *Environmental site assessment*.
- Letka. 2.001a. Investigación de suelos en los terrenos industriales.
- Letka. 2.001b. Investigación de saneamiento de la zona no saturada en los terrenos de las instalaciones.
- Letka. 2.003a. Construcción de pozos y muestreo de agua subterránea para el saneamiento de la zona saturada en los terrenos industriales.
- Letka. 2.003b. Muestreo de pozos de agua subterránea.
- Letka. 2.003c. Trabajos de reconocimiento hidrogeológico del pozo de abastecimiento N° 4 en los terrenos industriales.
- Letka. 2.003d. Caracterización de los terrenos de la línea de anodizado y planta de tratamiento físico químico.
- Letka. 2.003e. Caracterización de los terrenos de la línea de galvanizado (La 002).
- Letka. 2.003f. Caracterización de los terrenos de una línea de galvanizado (La 0005).
- Letka. 2.004a. Manual de operaciones y descripción del sistema de contención y tratamiento de aguas subterráneas
- Letka. 2.004b. Caracterización de los terrenos de dos líneas de galvanizado (La 003-La 004).
- Letka 2.005a. Caracterización de los terrenos de una línea de anodizado (La 006).
- Letka. 2.005b. Informe Preliminar de Situación, según lo establecido en el Real Decreto 9/2.005, de las instalaciones.
- Letka. 2.006. Investigación detallada de la calidad del suelo respecto a aceites minerales en las instalaciones.
- Letka. 2.010. Continuación de saneamiento de la zona no saturada y control y tratamiento de las aguas subterráneas de las instalaciones (Julio 2.009 – Julio 2.010).
- Pozas Terrados, Pedro. 2.009. Voces del Planeta. Ed. Aebius
- Real Decreto 09/2.005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
- Real Decreto 140/2.003, de 7 de febrero, por el cual se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- Sentencia judicial sobre el caso de Selenio. 2.006